

基于三轴霍尔传感器矢量合成的三维弱磁场测量仪

吴思慧, 龙广衡, 路增, 张静, 张群, 韩崇

徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年2月12日; 录用日期: 2025年3月5日; 发布日期: 2025年3月13日

摘要

磁感应测量仪器是电磁场研究领域的关键工具, 它在物理研究、电机制造以及电磁环境检测等多个重要领域都有着广泛应用。近年来, 随着科技的进步, 电磁场的测量研究更偏向于对三维动态磁场的精确测量, 而目前常用的磁场测量装置仍面临价格高昂或测量维度低等问题。本文提出了一种基于单轴霍尔传感器矢量合成设计方法的三维弱磁场测量仪, 利用霍尔传感器的高灵敏度、小体积等优点, 实现了对待测磁场的三维测量。该测量仪采用分点式探头获取 x 、 y 、 z 方向的磁场强度分量 B_x 、 B_y 、 B_z , 通过A/D转换模块转换为数字分量, 并通过矢量合成的方法求取矢量和, 即测量点空间三维磁感应强度大小。同时, 引入亥姆霍兹线圈结合磁屏蔽技术实现可控的局部均匀磁感应强度, 作为测量数据的校准对象。经过严格的实验验证, 该三维弱磁场测量仪对磁场强度的测量相对误差小于3.3%, 具有较高的可靠性。

关键词

霍尔传感器, 矢量合成, 三维弱磁场测量

Three-Dimensional Weak Magnetic Field Measurement Instrument Based on Vector Synthesis of Three-Axis Hall Sensor

Sihui Wu, Guangheng Long, Zeng Lu, Jing Zhang, Qun Zhang, Chong Han

School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Feb. 12th, 2025; accepted: Mar. 5th, 2025; published: Mar. 13th, 2025

Abstract

Magnetic induction measuring instruments are crucial tools in the field of electromagnetic research,

文章引用: 吴思慧, 龙广衡, 路增, 张静, 张群, 韩崇. 基于三轴霍尔传感器矢量合成的三维弱磁场测量仪[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(2): 106-116. DOI: 10.12677/jsta.2025.132012

widely applied in areas such as physical research, motor manufacturing, and electromagnetic environment detection. In recent years, with the advancement of technology, the focus of electromagnetic field measurement research has shifted towards the precise measurement of three-dimensional dynamic magnetic fields. However, the commonly used magnetic field measuring devices still face issues such as high cost or low measurement dimensions. This paper proposes a three-dimensional weak magnetic field measurement instrument based on the vector synthesis design method of single-axis Hall sensors, utilizing the advantages of high sensitivity and small size of Hall sensors to achieve three-dimensional measurement of the magnetic field to be tested. The instrument uses a distributed probe to obtain the magnetic field strength components in the x , y , and z directions, converts them into digital components through an A/D conversion module, and calculates the vector sum through vector synthesis, which is the size of the three-dimensional magnetic induction intensity at the measurement point. Meanwhile, Helmholtz coils combined with magnetic shielding technology are introduced to achieve a controllable local uniform magnetic induction intensity, serving as the calibration object for measurement data. After rigorous experimental verification, the relative error of the three-dimensional weak magnetic field measurement instrument for magnetic field strength measurement is less than 3.3%, demonstrating high reliability.

Keywords

Hall Sensor, Vector Synthesis, Three-Dimensional Weak Magnetic Field Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类对电磁现象的发现和研究的深入，磁的应用逐渐深入人们的日常生活，尤其在地质勘探、生物医学和材料科学等领域应用广泛。目前，我国科研人员发展了新型传感器和信号处理算法，显著增强了弱信号条件下的测量准确性，与国际量子传感器、光学测量方法同步创新，共同推进了微弱磁场测量技术的发展。随着科技的不断进步与发展，对空间微弱磁场的具体分布特征的研究日益精确，以便为更好地服务于人类社会的发展提供强有力的技术支撑。

本设计采用霍尔效应法测量微弱磁场，与传统仅测量磁场大小不同，本实验采用三片霍尔传感器芯片组成立体分点式探头，测量 x 、 y 、 z 三个方向的磁场大小，再通过 A/D 转换，进行矢量合成可以得到磁场的方向。同时，该测量仪利用了亥姆赫兹线圈进行校准，从而准确的描绘出弱磁场在三维空间中的具体分布。

2. 系统设计方案

该部分介绍的是基于霍尔效应芯片组成的三轴磁敏传感器探头，在亥姆赫兹线圈装置中测量弱磁场的基本流程。主要由三轴磁敏传感器探头、亥姆赫兹线圈、单片机等部分构成。图 1 为系统运行流程图。

装置利用三个一维霍尔效应芯片和特殊的 PCB 板设计，来实现三维磁场的测量任务。将磁场强度经转换成电信号后，通过单片机将该信号进行处理，然后通过 OLED 屏将三维的磁场大小显示出来。装置在正式测量前，先通过理论计算得到亥姆赫兹线圈中心位置的磁场大小，再与实验数据进行校准处理，以确定装置测量的准确性。

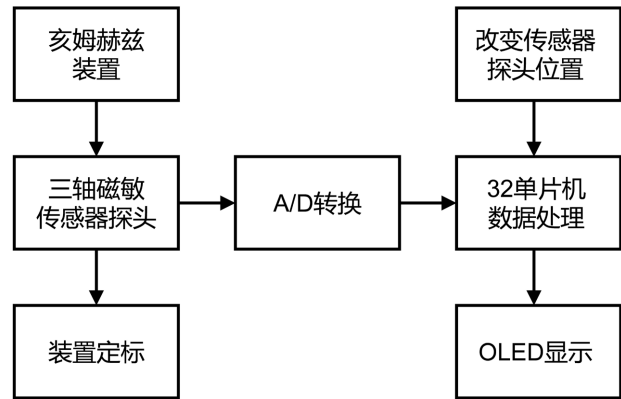


Figure 1. Three-dimensional weak magnetic field measurement flow chart
图 1. 三维弱磁场测量流程图

3. 基本原理

3.1. 霍尔效应法的基本原理

霍尔效应是一种电磁效应，即如果在电流的垂直方向加上磁场，则在与电流和磁场都垂直的方向上将建立一个电场[1]。霍尔效应的本质是运动的电荷在磁场中受到洛伦兹力的作用后出现偏转，如下图 2 所示。

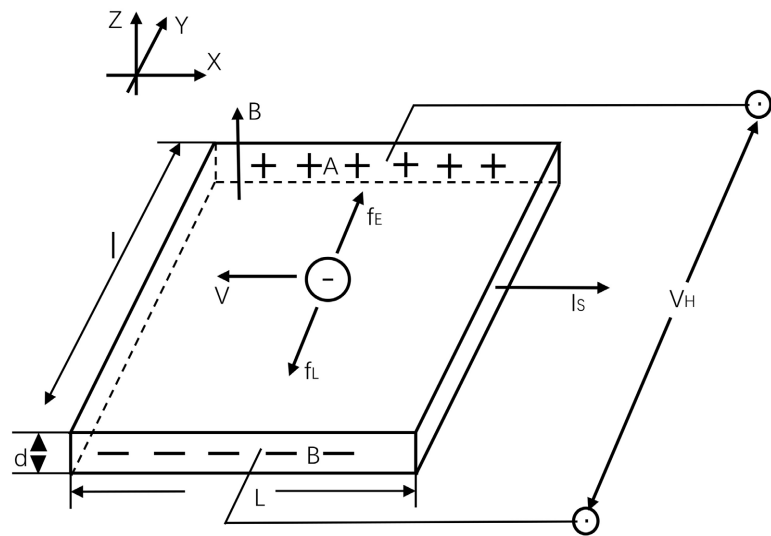


Figure 2. Hall effect principle diagram
图 2. 霍尔效应原理图

在上图 2 中，由于运动电荷受到洛伦兹力的作用，电子 Y 轴负方向 B 端偏转，并使 B 侧形成电子积累，随着 B 侧形成电子积累数量的增加，洛伦兹力 f_L 增大，当两力大小相等时 $f_L = -f_E$ ，则电子积累达到动态平衡。这时 A、B 两端面建立的电场为霍尔电场 E_H ，相应的电势为 V_H 。

设电子按速度 v ，向图示 X 轴负方向运动，在磁场 B 的作用下，所受的洛伦兹力为：

$$f_L = -evB \tag{1}$$

同时在电场作用下的电场力：

$$f_E = -eE_H = -e \frac{V_H}{b} \quad (2)$$

当达到动态平衡时有：

$$evB = e \frac{V_H}{b} \Rightarrow V_H = vBb \quad (3)$$

设半导体霍尔元件厚度为 d ，宽度为 b ，载流子浓度为 n ，则工作电流为：

$$I_s = nevbd \Rightarrow v = \frac{I_s}{nebv} \quad (4)$$

将(1)式带入(2)可得：

$$V_H = \frac{I_s B}{ned} \text{ 或 } V_H = I_s B K_H \quad (5)$$

其中 K_H 为霍尔元件的霍尔灵敏度，反映霍尔效应强弱的重要参数，单位 $V/(A \cdot T)$ [2]。

3.2. 霍尔传感器的基本原理

霍尔传感器的磁场测量范围大，典型测量范围为 $10^{-7} \sim 10$ T，分辨率高，可以达到 10^{-7} T，可用于测量交、直流磁场和脉冲磁场的各种分量，也可用于测量缝隙磁场[3]。

霍尔传感器利用半导体薄片，在电流和磁场作用下，其载流子会发生偏移，这种偏移会在霍尔元件的一个侧面积累负电荷，而在相对的侧面积累正电荷，从而在 y 方向上形成电压，即霍尔电压 V_h 。霍尔电压的大小与磁感应强度 B 成正比，与通过霍尔元件的电流 I 成正比，并与霍尔元件的厚度 d 成反比。

公式可以表示为：

$$V_h = BIdn \quad (6)$$

其中， n 是霍尔系数，它取决于材料的性质。

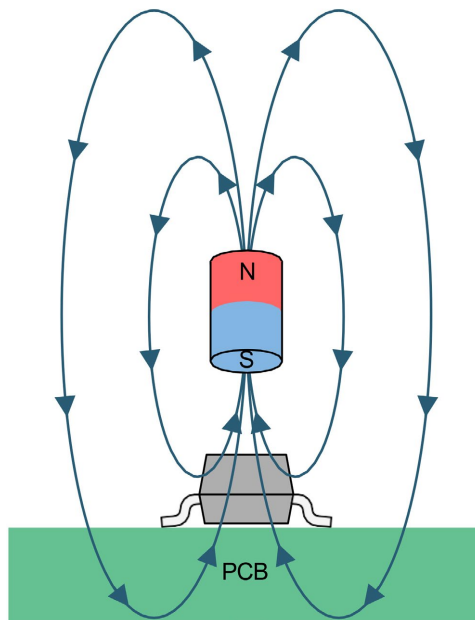


Figure 3. Schematic diagram of the magnetic field measured by the Hall chip
图 3. 霍尔芯片测量磁场示意图

本装置采用等 DRV5055 霍尔效应芯片对磁场进行测量, 当磁场穿过 DRV5055 时, 霍尔传感器内部的霍尔元件会产生一个与磁场强度成正比的电压信号, 如图 3 测量示意图所示。该信号经过内置的信号调理电路处理后, 输出一个可以直接由微控制器或其他电路读取的电压信号。其结构简单、体积小、响应速度快、输出信号稳定等特点, 广泛应用于各种磁场测量、位置检测和速度检测等场合。

3.3 亥姆赫兹线圈

根据毕奥 - 萨伐尔定律, 载流线圈在轴线(通过圆心并与线圈平面垂直的直线上)某点的磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}} NI \quad (7)$$

式中 I 为通过线圈的电流强度, N 为线圈匝数, R 为线圈平均半径, X 为圆心到该点的距离, μ_0 为真空磁导率。沿 x 轴的磁感应强度分布具体如图 4 所示:

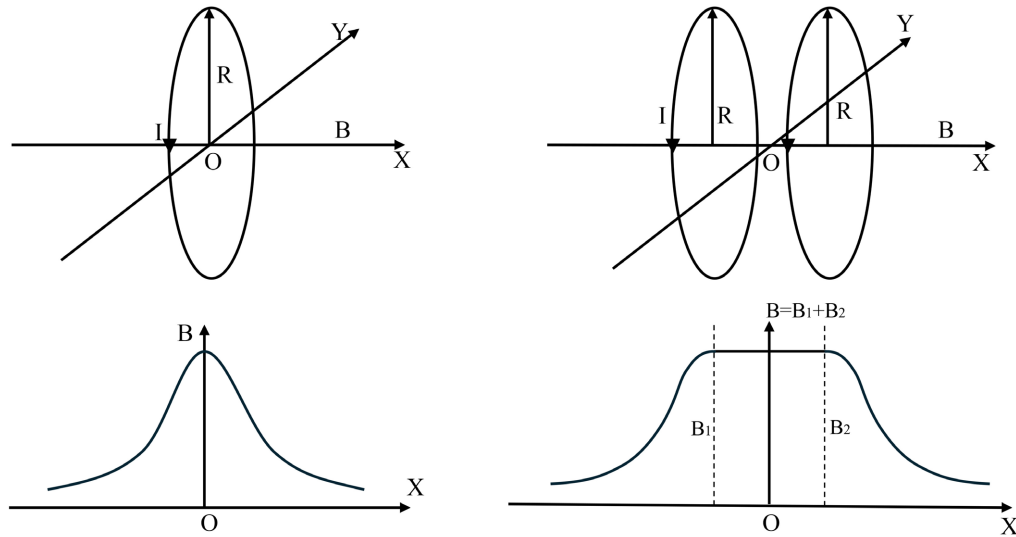


Figure 4. Magnetic field distribution on the axis when $d = R$

图 4. $d = R$ 时轴线上磁场分布

设 Z 为双圆线圈中轴线上某点离中心点 O 处的距离, 则亥姆霍兹线圈轴线上任意点的磁感应强度为:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 R^2 NI \left\{ \left[R^2 + \left(\frac{d}{2} + Z \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[R^2 + \left(\frac{d}{2} - Z \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad [2] \quad (8)$$

4. 系统工作原理

4.1. 三轴磁敏传感器探头

空间任意方向磁感应强度 B 都可以分成 3 个互相垂直的分量 B_x 、 B_y 、 B_z [4], 如图 5 所示。由式 (9)、(10) 可得: $|B|$ 为磁感应强度 B 的模值, α 、 β 、 γ 分别为磁感应强度 B 的方向角[5]。综上设计一个三轴磁敏传感器探头, 分别测量 x 、 y 、 z 方向的磁感应强度。

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \frac{B_x}{|B|}, \quad \cos \beta = \frac{B_y}{|B|}, \quad \cos \gamma = \frac{B_z}{|B|} \quad (10)$$

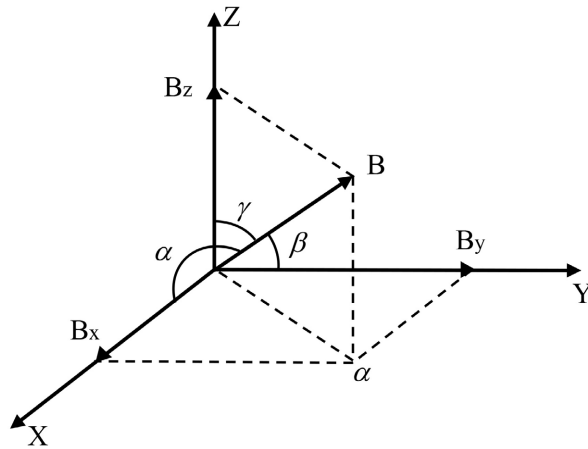


Figure 5. Three-dimensional vector diagram of the magnetic field in space
图 5. 空间三维磁场矢量图

传统所使用的霍尔传感器只能对一维的磁场进行测量，因此装置采用了特殊的 PCB 设计方法如图 6 所示，将三个一维的霍尔芯片以直角坐标系进行排布得到三轴磁敏传感器探头。分别测量 x 、 y 、 z 三轴方向上的磁场分量，再通过对数据矢量合成得到三维空间的磁场大小。

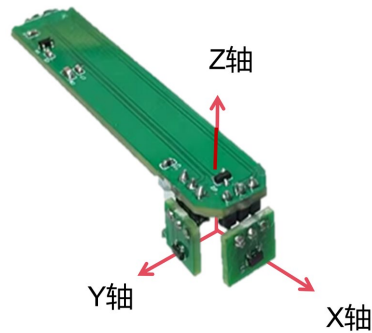


Figure 6. Three-axis magnetic sensor probe
图 6. 三轴磁敏传感器探头

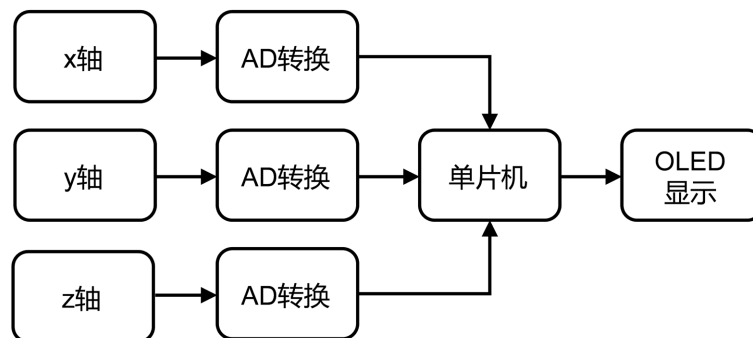


Figure 7. Measurement demonstration diagram
图 7. 测量演示图

在测量时，为确保测量的时效性，装置采用三路 AD 同时采集如图 7。同时单片机对三路数据进行处理，得到准确的实时磁场数据。

为确保装置的磁场精度与稳定性，装置需要较为稳定的电源。为此在装置中设计了一套滤波电路为装置通过稳定的电源，如图 8 所示。并通过在软件部分加入滤波算法提高装置测量的准确性。

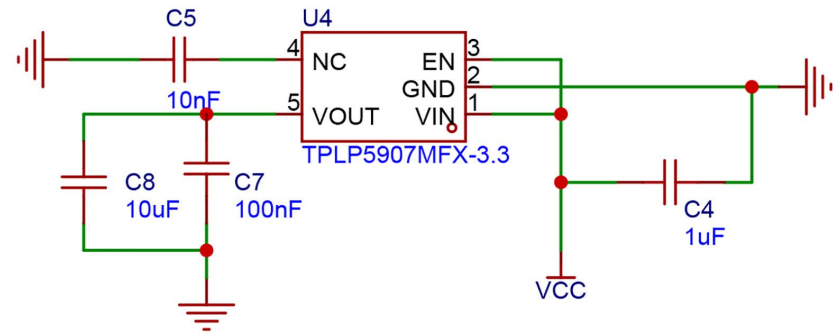


Figure 8. Filter circuit measurement demonstration diagram
图 8. 滤波电路测量演示图

4.2. 定标

本设计的亥姆赫兹装置规格如下：线圈间距与半径均为 10 厘米，每个线圈由 24 匝、直径为 1 毫米的导线绕制而成。如图 9 所示， x 、 y 、 z 轴分别代表了三轴磁敏传感器探头的测量方向。根据亥姆赫兹线圈的规格参数，可以理论计算出磁场强度的标准值，而利用三轴磁敏传感器探头则可获取实验数据。通过调节流经线圈的电流大小，逐步增加或减少磁场强度，并在每次改变后再次使用霍尔传感器测量新的磁场强度。基于这些数据，可以确立电流与磁场强度之间的对应关系，从而构建出亥姆赫兹装置的标准值与实验值之间的关系曲线，以此作为校准曲线。

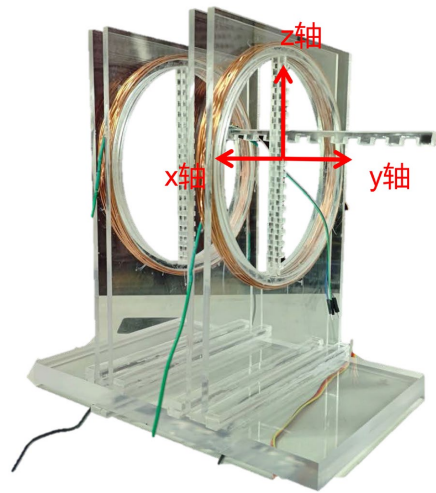


Figure 9. Helmholtz coil diagram
图 9. 亥姆赫兹装置实物图

4.3. 横尺

在本设计中，将横尺与三轴磁敏传感器探头固定在一起，以便测量空间中各个位置的磁场矢量，

从而得到整体磁场分布图，如图 9 细节图所示。通过横尺的调节，三轴磁敏传感器探头能够在水平方向(即 y 轴方向)进行 4 次位移，同时在垂直方向(即 z 轴方向)进行 13 次位移，下文以垂直 - 水平记录各位置，进而通过改变横尺的位移得到各位置的磁场矢量，如图 10、图 11 示意图所示。

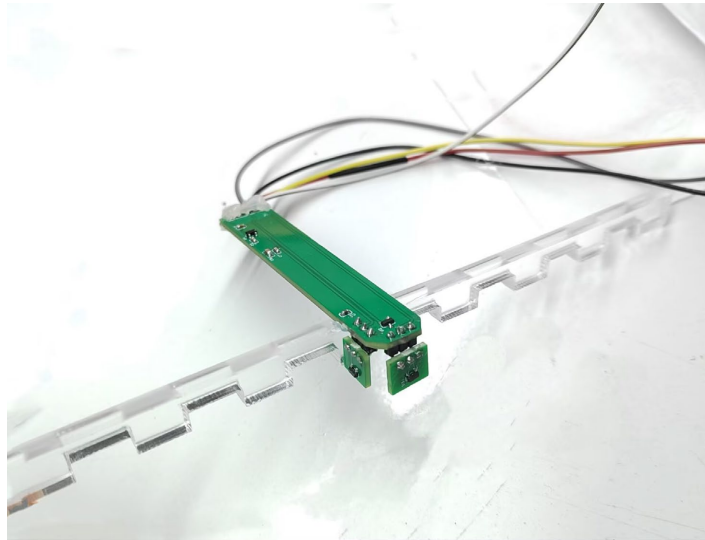


Figure 10. Diagram of the horizontal scale
图 10. 横尺细节图

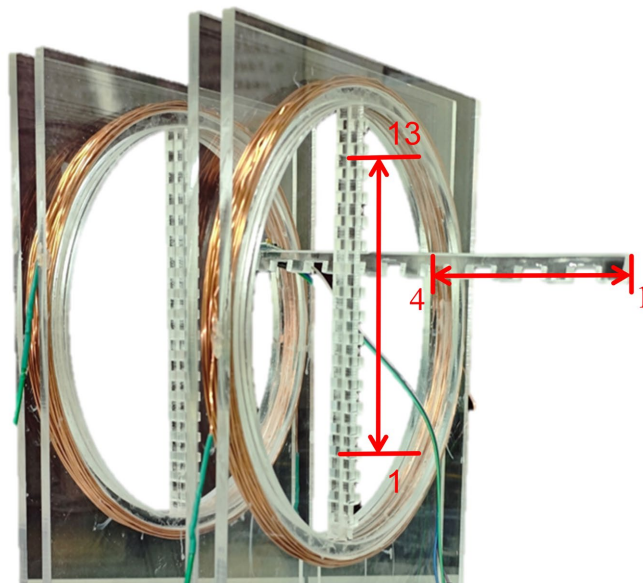


Figure 11. Operational schematic of the horizontal scale
图 11. 横尺工作示意图

5. 实验结果和误差分析

5.1 亥姆赫兹装置定标

基于亥姆赫兹双线圈系统的磁场分布特性，本设计选取 $z = 0$ 平面作为参考磁场平面，对电流从 1 A 递增至 2 A，以 0.2 A 为步长的变化过程中磁场的强度差异进行了研究，得到表 1 的相关数据。

Table 1. Calibration data for the Helmholtz coil

表 1. 亥姆赫兹装置定标的标准试验系统结果数据

电流/A	标准值/Gs	实验值/Gs
1.0	3.01	2.87
1.2	3.62	3.41
1.4	4.22	4.02
1.6	4.82	4.63
1.8	5.42	5.20
2.0	6.03	5.71

据此，绘制了图 12 所示的亥姆霍兹装置校准曲线。依据图中的校准方程，后续验证实验中所获得的实验数据均已进行了相应的校准处理。

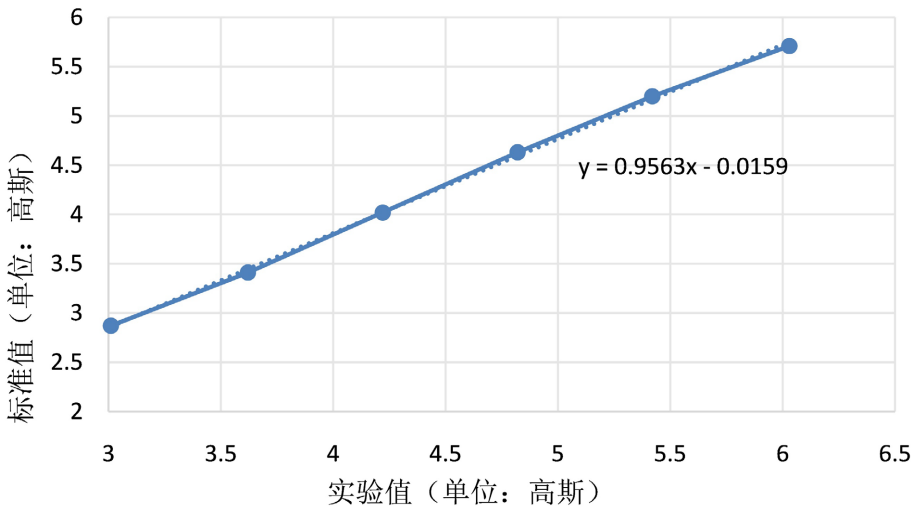


Figure 12. Calibration curve of the Helmholtz coil

图 12. 亥姆赫兹装置的校准曲线

5.2. 亥姆赫兹双线圈

为了验证亥姆霍兹双线圈的磁场分布情况，本设计通过精细调节横尺的位移，并相应地改变流经线圈的电流大小，分别测得的 3 个磁感应强度分量和合磁感应强度值数据见表 2。

Table 2. Magnetic induction intensity at the center point on the axis of the Helmholtz coil

表 2. 亥姆赫兹轴线上中心点磁感应强度

I/A	B_x/Gs	B_y/Gs	B_z/Gs	$B_{标准}/Gs$	$B_{实验}/Gs$	误差/Gs	相对误差/%
1.0	0.36	2.91	0.11	3.01	2.93	0.08	2.7%
1.2	0.22	3.52	0.06	3.62	3.53	0.09	2.5%
1.4	0.20	4.11	0.04	4.22	4.12	0.10	2.3%
1.6	0.13	4.76	0.10	4.82	4.76	0.06	1.2%
1.8	0.22	5.33	0.17	5.42	5.34	0.08	1.5%
2.0	0.22	5.98	0.25	6.03	5.99	0.04	0.7%

实验数据显示，在 1.0 A 至 2.0 A 电流区间，随着电流的增大，误差逐渐减小，在较大电流下，亥姆霍兹双线圈产生的磁场的均匀性得到了更好的保障。

5.3. 单线圈

为了验证单线圈的磁场分布情况，将亥姆赫兹装置的其中一个线圈断电，从而构成单线圈模型。同理，通过横尺精细改变测量点的位移，并同步调整流经线圈的电流强度，得到了校准后的单线圈磁场分布的实验数据。如表 3 所示。

Table 3. Magnetic induction intensity on the axis of a single coil
表 3. 单线圈轴线上磁感应强度

I/A	B_x/Gs	B_y/Gs	B_z/Gs	$B_{标准}/Gs$	$B_{实验}/Gs$	误差/Gs	相对误差/%
1.0	0.42	1.49	0.22	1.51	1.56	0.05	3.3%
1.2	0.30	1.83	0.17	1.81	1.86	0.05	2.7%
1.4	0.41	2.02	0.19	2.11	2.07	0.04	1.9%
1.6	0.33	2.45	0.12	2.42	2.49	0.07	2.8%
1.8	0.44	2.72	0.16	2.76	2.77	0.01	0.4%
2.0	0.29	3.06	0.13	3.02	3.08	0.06	2.0%

6. 创新点及应用

6.1. 创新点

- (1) 设计特殊 PCB 的三轴测量装置——三轴磁敏传感器探头，实现对 x 、 y 、 z 三轴磁场分量的同步测量，最后利用矢量合成技术确定磁场方向；
- (2) 引入三路 A/D 同步采集系统和滤波电路，提高测量精度，减少测量噪声；
- (3) 利用亥姆赫兹装置定标和横尺位移调节，构建准确校准曲线，获取空间磁场矢量，绘制整体磁场分布图。

6.2. 应用

- (1) 地质勘探：通过分析地磁场的变化，帮助探测矿产资源或评估地质结构；
- (2) 环境保护：监测环境污染，如电磁辐射的分布情况，为环境保护提供技术支持；
- (3) 精密工程与质量控制：通过磁场分布的精确测量，从而控制产品质量，确保设备的精确度和可靠性；
- (4) 生物医学研究：测量生物组织或器官产生的微弱磁场，为神经科学、心血管疾病等领域的诊断和研究提供重要数据。

7. 结论与展望

本设计创新性地设计了三轴磁敏传感器探头，该仪器的测量精度为 0.01 Gs，测量范围为±6.0 Gs，在 1.0 A 至 2.0 A 电流区间内，测量最大误差为 0.07 Gs，相对误差较小，测量结果可靠。随着电流增大，测量误差逐渐减小，最大相对误差可控制在 3.3%，最小相对误差为 0.4%。与传统的单方向测量相比，本设计不仅能够测量磁场的大小，还能通过矢量合成技术确定磁场的方向，从而在三维空间中精确描绘出磁场的具体分布。

本设计测量的误差主要源于传感器对温度变化敏感，后续团队将继续优化温度补偿。此外，该系统的空间分辨率有待提高，改进需要高精度传感器和更精细的位移控制系统。

综上所述，本设计在三维磁场测量技术上的创新与改进，对于提升磁场测量的准确性和效率具有重要意义。随着技术的不断进步和系统的进一步优化，本设计将更加智能化、精准化，为磁场测量技术的持续发展提供重要支撑。同时，它将在环境保护和可持续发展方面发挥更大作用，为相关产业的科技进步和创新发展贡献显著价值。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练项目(基于三维空间磁场探测的路况检测系统，202411998045Y)。

参考文献

- [1] 吴魏霞, 杨少波, 张明长. 一种霍尔效应测量磁场的设计方法[J]. 大学物理实验, 2010, 23(5): 38-40.
- [2] 魏奶萍. 霍尔效应法测量通电双圆线圈磁场的数据处理[J]. 大学物理实验, 2016, 29(2): 110.
- [3] 陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路, 等. 三维磁场精密测量系统的研制[J]. 测试技术学报, 2005(3): 279-282.
- [4] 谭穗妍, 翁嘉文. 高精度三维弱磁场测量仪[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(11): 107-110.
- [5] 李雪琴, 唐艳妮, 刘芯, 等. 一种空间磁场可视化测量系统的设计[J]. 大学物理实验, 2022, 35(1): 34-39.